

тем изменения степени перекрытия бильных элементов сепарационным кольцеобразным диском.

**Список литературы:** 1. Беренс Д. Новые конструкции машин ударного действия для тонкого и сверхтонкого размола.- Труды Европейского совещания по измельчению, Стройиздат. - 1966. 2. Блиничев В.Н. Разработка оборудования и методов его расчета для интенсификации процессов тонкого измельчения и химической реакции в твердых телах: дисс. ... д-ра техн. наук. – Иваново: ИХТИ. - 1975. – 210 с. 3. Максимов Ф.Е. Разработка конструкции и метода расчета ударно-отражательного измельчителя: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИХМ. – 1989. – 178 с. 4. А.с. № 904775 (СССР) Мельница ударного действия / Смирнов Н.И., Блиничев В.Н. – Оpubл. в Б.И., 1979, № 25. 5. А.с. №1475707 (СССР) Центробежная ударная мельница / Шишков Н.И., Антоненко В.Ф., Макаров Ю.И. и др. – Оpubл. в Б.И., 1989, № 16. 6. Пат. а 2001096302 (Україна) Відцентровий млин ударної дії / Шишков М.І., Сорока П.Г., Зражевський В.І., Задорожний В.М.; Оpubл. Б.И., 2004, № 12.

*Поступила в редколлегию 11.09.08*

УДК 622.7

**П.И. ПИЛОВ**, докт. техн. наук

**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, докт. техн. наук, НГУ, г. Днепропетровск

**В.П. КРАВЧЕНКО**, инж., ОАО “ММК им. Ильича”, г. Мариуполь

**В.В. ГАЕВОЙ**, канд. техн. наук, НГУ, г. Днепропетровск

**Л.А. ЦЫБУЛЬКО**, канд. техн. наук, **И.А. ШУЛЯК**, канд. техн. наук,

**И.В. ВЕРХОРОБИНА**, ИГТМ НАН Украины

## **ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ**

Встановлено покращення гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків при струменевому подрібненні, що дозволяє їх використовувати в якості в'язучої речовини у будівельних розчинах.

The improvement of the blast-furnace granular slags characteristics under jet pounding has been established that be used as a basis for the astringent in building grouts.

Доменные шлаки являются скрытно-гидравлическими веществами, у которых высокая потенциальная способность к твердению проявляется в особом состоянии шлака. Полагают, что из-за быстрого охлаждения при грануляции в шлаке возможно аккумулялирование некоторого количества скрытой энергии [1]. Для повышения гидравлической активности гранулированного

доменного шлака состояние применяют измельчение с добавкой активирующих веществ: извести, гипса, портландцементного клинкера. Это свойство гидравлического твердения доменных шлаков используется при получении шлакопортландцементов путем смешения и совместного помола доменных граншлаков и клинкера. В зависимости от массовой доли доменных граншлаков в цементе получают различные виды шлакопортландцементов, причем, чем выше содержание шлака, тем ниже марка цемента.

В настоящее время повышение гидравлической активности доменных шлаков осуществляют путем измельчения в шаровой мельнице. Например, на ОАО “Металлургический комбинат им. Ильича” измельченный гранулированный шлак используют при производстве стройматериалов в качестве добавки до 30 % от массы шихты. Однако невысокая дисперсность измельченного шлака, обуславливает прочность на сжатие образцов не выше 14 МПа. Достижение более высокой дисперсности в барабанных мельницах считают нецелесообразным из-за значительного снижения производительности мельницы и роста удельных энергозатрат.

В данной работе ставилась задача установления режимов струйного измельчения доменного гранулированного шлака, при которых достигается его рациональная дисперсность и максимальные эффекты механоактивации. С позиции физики разрушения механоактивация – это одна из форм автовозбуждения активности вещества на стадии спонтанного разрушения (саморазрушения, диспергирования) нагруженного твердого тела [2].

Эффекты механоактивации практически оценивают по изменениям энергетического состояния вещества в процессе измельчения, физико-химических и технологических свойств диспергированных материалов и изделий на их основе. К числу факторов, задающих эти эффекты, относится уровень энергетических параметров разрушения нагружаемого образца, а именно: средней  $W_V$  (в объеме образца) и локальной  $W_{DV}$  (в очагах разрушения) плотности энергии при разрушении [3]. Для повышения уровня этих параметров и, как следствие, эффективности измельчения, необходимо приближать скорость нагружения измельчаемых частиц к критической скорости авторезонанса, реализующей предельную скорость перестройки кристаллической решетки вещества. Это возможно при высоких скоростях и частотах соударений частиц в процессе измельчения, например, в режимах противоточного струйного измельчения.

В работах [3 – 6] экспериментально доказано улучшение технологиче-

ских свойств при струйном измельчении различных вяжущих материалов: технический глинозем, муллит-корундовый шамот, цемент, шлак, формовочный гипс. Приведем некоторые примеры положительного влияния струйной обработки материалов.

1. Измельченные порошки гипса обладают меньшей агрегируемостью по сравнению с продуктами барабанной мельницы при близких значениях их удельной поверхности, увеличенной на 40 % прочностью изделий, изготовленных на основе тонкодисперсных порошков струйного помола гипса.

2. Повышение прочности на 33 % установлено для обожженных огнеупорных изделий, полученных с добавкой 30 – 45 % фракции менее 40 мкм струйного помола технического глинозема или муллит-корундового шамота (преобладающий размер частиц глинозема составляет 2 – 5 мкм, шамота – 5 – 10 мкм).

3. Установлена возможность получения цементов высоких марок для тампонажных растворов с требуемыми реологическими свойствами с целью повышения качества изоляционных работ при бурении скважин [3]. В диапазоне удельной поверхности цемента  $S = 3750 - 6900 \text{ см}^2/\text{г}$  уменьшается растекаемость цементного раствора, увеличивается пластическая вязкость и сокращаются в 1,5 – 2 раза сроки схватывания.

4. При сопоставимой дисперсности измельченного клинкера содержание фракции  $b_{-30}$  менее 30 мкм, способствующей твердению цемента, в продуктах струйного измельчения значительно больше по сравнению с шаровым помолом [6]:

- струйный метод:

- $S_{\text{уд}} = 0,33 \text{ м}^2/\text{г}$ .

- $b_{-30} = 89,8 \text{ \%}$ ;

- шаровой метод:

- $S_{\text{уд}} = 0,31 \text{ м}^2/\text{г}$

- $b_{-30} 74,4 \text{ \%}$ ;

- струйный метод:

- $S_{\text{уд}} = 0,4 \text{ м}^2/\text{г}$

- $b_{-30} 92,4 \text{ \%}$ ;

- шаровой метод:

- $S_{\text{уд}} = 0,37 \text{ м}^2/\text{г}$

- $b_{-30} 77,1 \text{ \%}$ .

В таблице 1 отражено влияние способа измельчения (в барабанной, струйной и центробежной мельницах) на дисперсность и свойства цементов.

Таблица 1

Дисперсность и технологические свойства цементов,  
измельченных различными методами

№ п/п	Вид мельницы	Остаток на сите, %		$S_{уд},$ $м^2/г$	Прочность $s$ , МПа	
		80 мкм	40 мкм		на изгиб 28 сут.	на сжатие 28 сут.
1	струйная	0,4	1,2	0,24	6,5	43,4
2	струйная	0,2	0,5	0,33	7,0	52,3
3	струйная	0,0	0,0	0,40	7,3	58,9
4	шаровая	1,7	9,3	0,25	5,0	34,0
5	шаровая	0,7	2,5	0,31	5,5	45,6
6	шаровая	1,5	2,8	0,35	5,9	42,0
7	шаровая	1,5	2,3	0,37	6,1	46,2
8	шаровая	7,0	-	0,29	6,3	44,2
9	центробежная	0,1	8,8	0,25	6,3	48,4
10	центробежная	4,7	18,9	0,21	6,1	45,3
11	центробежная	0	2,2	0,28	5,7	48,6

Примечание: Результаты опытов 8 – 11 приведены из работы [7]

Поскольку содержание тонкодисперсных активированных фракций  $b_{-40}$  (менее 40 мкм – на 2 ÷ 3 %) в цементах струйного помола более высокое, чем в при шаровом и центробежном измельчении, наблюдается увеличение прочности на сжатие образцов из цементов (на 4 – 7 МПа) струйного помола при близких величинах  $S_{уд}$  порошков:

- струйная:
  - $S_{уд} = 0,33 \text{ м}^2/г$
  - $s = 52,3 \text{ МПа}$ ;
- центробежная:
  - $S_{уд} = 0,28 \text{ м}^2/г$
  - $s = 48,6 \text{ МПа}$ ;
- шаровая мельница:
  - $S_{уд} = 0,31 \text{ м}^2/г$
  - $s = 45,6 \text{ МПа}$ .

В данной работе исследованию струйного измельчения подвергался тонкогранулированный шлак – продукт грубого помола в барабанной шаро-

вой мельнице. Крупность исходного шлака составила 0,5 – 0 мм, остаток на сите 0,1 мм – 18,1 %, на сите 0,05 мм – 52,8 %. Испытания проведены на установке лабораторного типоразмера (производительность – 5 ÷ 30 кг/ч). В зависимости от параметров энергоносителя и режима работы классификатора изменялись выход и дисперсность продуктов, уловленных в двух типах пылеуловителей (циклоне и тканевом фильтре).

Соотношение продуктов циклона и фильтра составило, %: (91,9 – 95,9) : (8,1 – 4,1). В некоторых опытах проводилось измельчение клинкера и смеси шлака с гипсом с целью изучения влияния активирующей добавки на технологические свойства измельченного шлака. Величина добавки гипса задавалась в количестве: 3, 5, 7 и 10 %. Производительность струйной установки составила  $G = 4,5 - 5,1$  кг/ч при давлении сжатого воздуха  $P = 0,3 - 0,4$  МПа. Частота вращения ротора отбойно-вихревого классификатора поддерживалась на уровне  $n = 2500$  мин<sup>-1</sup>, удельный расход энергоносителя составил  $q = 17,6 - 20,0$  м<sup>3</sup>/кг продукта. При измельчении более крупного доменного гранулированного шлака (до 3 мм) производительность установки составила  $G = 2,1 - 5,0$  кг/ч при  $n$  в пределах 600 – 2000 мин<sup>-1</sup>,  $q = 15,6 - 42,8$  м<sup>3</sup>/кг.

Для прогнозной оценки энергоемкости струйного измельчения (от 500 до 10 мкм) в промышленных условиях ( $G = 2000$  кг/ч) используем обобщенную зависимость опытных данных удельного расхода  $q$  энергоносителя от производительности струйной установки в диапазоне  $G = 2 - 2000$  кг/ч:  $q = (48,65 + 0,98 G) / (1 + 0,298 G)$ ; коэффициент корреляции  $r = 0,97$  [3].

Обобщение опытных данных проведено для дисперсности продуктов струйного измельчения шлака, песка, клинкера, циркона – порядка 100 % менее 40 – 60 мкм при среднем размере частиц  $d_{cp} = 10 - 20$  мкм. С учетом этой зависимости  $q = f(G)$  эмпирическая величина  $q$  при производительности  $G = 2000$  кг/ч составит  $q_{2000} = 3,36$  м<sup>3</sup>/кг. Если принять во внимание повышение дисперсности продукта от  $d_{cp} = 10 - 20$  мкм до  $d_{cp} = 4 - 5$  мкм и обратно пропорциональный характер связи удельного расхода  $q$  и среднего размера  $d_{cp}$  частиц, то величину  $q$  следует увеличить в  $d_{cp}^1 / d_{cp}^2 = 10 / 4 = 2,5$  раза. Таким образом, предполагаемый удельный расход энергоносителя  $q_{2000}$  составит для установки производительностью  $G = 2000$  кг/ч :  $q_{2000} = 3,36 \times 2,5 = 8,4$  м<sup>3</sup>/кг шлака с удельной поверхностью  $S_{ц} \geq 0,6$  м<sup>2</sup>/г (по прибору Т-3 В.В. Товарова).

Оценка показателей дисперсности (удельной поверхности, среднего размера частиц, распределения фракций) измельченного шлака была прове-

дена на приборе фирмы «MALVERN». Установлено, что шлак (продукт циклона) с удельной поверхностью  $S_{уд} = 0,5 \text{ м}^2/\text{г}$  и средним размером частиц  $d_{ср} = 4 \text{ мкм}$  имеет следующий фракционный состав: 100 % класса менее 12 мкм, 99,7 % класса менее 10 мкм, 76,1 % класса менее 5 мкм, 3,1 % класса менее 1 мкм.

В таблице 2 приведены результаты оценки технологических свойств шлака различной дисперсности, измельченного сравниваемыми способами без активирующих добавок и в составе смесей (гипс, клинкер, шлак), проведенной в ЦЗЛ ОАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» [7]. В экспериментах максимальная дисперсность измельченного шлака, оцениваемая величиной удельной поверхности составила: для продукта циклона –  $S_{ц} = 0,68\text{-}0,92 \text{ м}^2/\text{г}$ , для продукта фильтра –  $S_{ф} = 1,81 – 2,18 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Таблица 2

Технологические свойства продуктов  
струйного и шарового измельчения граншлака и смесей

№ п/п	Способ измельчения	Состав материала	$S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$ (Т-3)	Прочность при сжатии 7сут., МПа	Прочность при сжатии 28сут., МПа
1	струйный	шлак	0,72	15,9	30,0
2	струйный	шлак	0,87	16,4	30,0
3	шаровой	шлак	0,4	6,0	14,3
4	струйный шаровой	шлак – 50 % шлак – 50 %	0,92 0,4	11,6	17,8
5	струйный шаровой	шлак – 75 % клинкер – 25 %	0,87	19,5	40,2
6	струйный шаровой	шлак – 80 % клинкер – 20 %	0,87	20,8	40,0
7	струйный шаровой	шлак – 75 % клинкер – 25 % гипс – 5 %	0,75	21,2	41,5
8	шаровой шаровой	клинкер – 95 % гипс – 5 %	0,24	24,5	41,1
9	струйный шаровой	шлак – 75 % клинкер – 17 % гипс – 8 %	0,75	22,9	39,9
10	струйный	шлак – 93 % гипс – 7 % клинкер – 10 %	0,70	17,8	31,3

Из таблицы 2 видно, что измельченный в струях гранулированный доменный шлак способен частично заменить цемент при удельной поверхности продукта  $S_{уд} \geq 0,6 - 0,9 \text{ м}^2/\text{г}$ .

На рис. 1 показано изменение прочности  $\sigma$  изделий на основе диспергированного шлака и химического состава продуктов циклона и фильтра при различной дисперсности порошков. Результаты испытаний показали, что прочность на сжатие образцов из шлаков струйного помола без активаторов составляет 30 МПа.

Важно отметить, что в области максимума  $\sigma$  при  $S_{ц} = 0,68 - 0,92 \text{ м}^2/\text{г}$  наблюдается увеличение содержания (на 0,5 – 1,0 %) основных минералообразующих оксидов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в измельченном шлаке по сравнению с исходным.

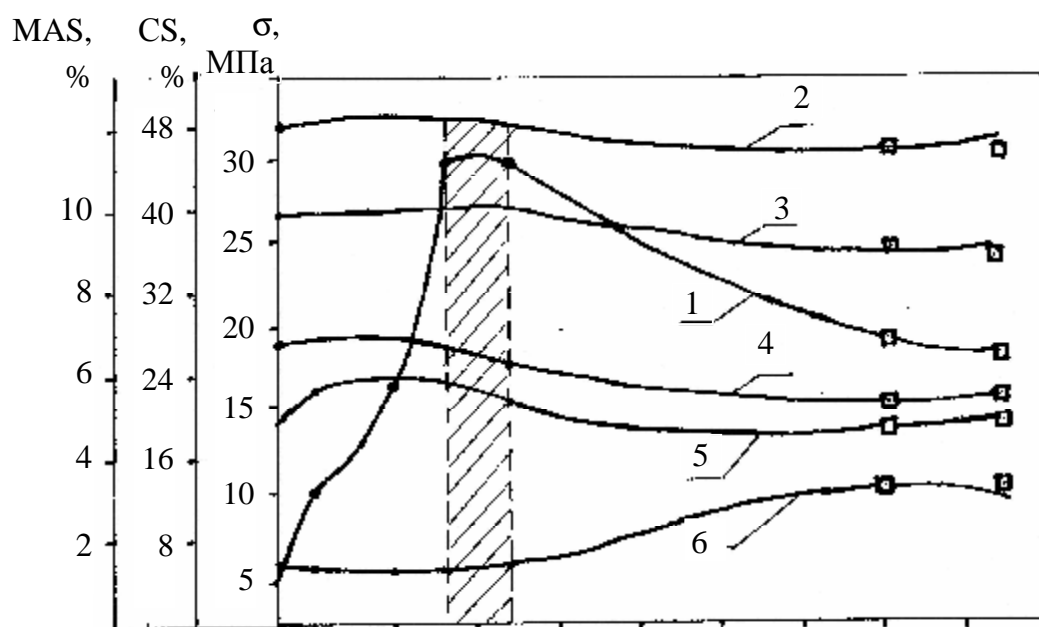


Рис. 1. Влияние дисперсности на прочность образцов и химический состав измельченного шлака:

• – продукт циклона; .. – продукт фильтра;  
1 –  $\sigma$ , МПа; 2 –  $\text{CaO}$ , %; 3 –  $\text{SiO}_2$ , %; 4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5 –  $\text{MgO}$ , %; 6 –  $\text{S}$ , %.

При этом содержание серы в продукте циклона составляет величину, практически вдвое меньше, чем в продукте фильтра. Это обусловлено селективностью процесса струйного измельчения, при котором наиболее легко вскрываемые примеси (аморфный кремнезем, сера, окалина, органические вещества) улавливаются в пылеочистном устройстве установки, заметно

улучшая качество основного продукта в циклоне. Надо полагать, продукт фильтра с удельной поверхностью порядка  $S_{\phi} = 1,8 - 2,2 \text{ м}^2/\text{г}$  может найти применение в качестве микронаполнителя в технологии низкомарочных бетонов с целью повышения их прочности и стойкости [8].

На рис. 2 показано влияние массовой доли клинкера в шихте на прочность изделий с использованием измельченного гранулированного и отвального шлака. Испытания граншлаков струйного помола в смеси с клинкером  $[(75 - 80) : (20 - 25)]$  показали достаточно высокую прочность – марку 400, что характерно для измельченной шарами смеси клинкера с гипсом (95 : 5). При этом тонкость помола цемента шарами контролировалась остатком на сите 80 мкм – не более 8 – 15 %.

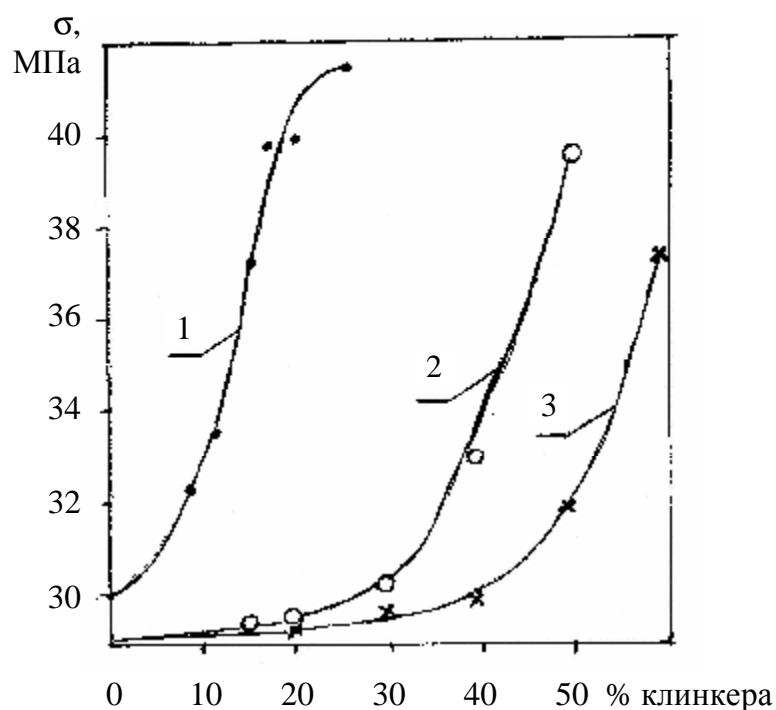


Рис. 2. Зависимость прочности образцов на основе измельченного шлака от массовой доли клинкера в шихте:

- 1 – граншлак струйного помола, 2 – граншлак шарового помола,  
3 – отвальный шлак шарового помола.

Таким образом, струйную технологию измельчения граншлака можно рекомендовать для получения из него самостоятельного вяжущего вещества в строительных растворах и изделиях [9]. Для этой цели пригодны также смеси с портландцементным клинкером в соотношении (4 – 5) : 1 (соответственно в стандартном цементе содержание клинкера – до 95 %).



## Выводы.

1. Определен режим струйного измельчения (от 500 до 10 мкм) граншлака, обеспечивающий получение порошков с максимальной гидравлической активностью и высокой прочностью образцов на их основе: давление энергоносителя  $P = 0,3 - 0,4$  МПа, частота вращения ротора классификатора -  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ . Величина удельной поверхности измельченного в этом режиме шлака составляет: для продукта циклона -  $S_{\text{ц}} = 0,6 - 0,9 \text{ м}^2/\text{г}$ , для продукта фильтра -  $S_{\text{ф}} = 1,8 - 2,2 \text{ м}^2/\text{г}$ .

2. При изменении дисперсности продуктов циклона и фильтра наблюдаются различия их химического состава, так что в продукте циклона (массовая доля - 92 - 96 %) в 2 раза уменьшается содержание серы и увеличивается на 0,5 - 1 % содержание основных оксидов, что можно объяснить селективностью струйного процесса измельчения.

3. Максимальная гидравлическая активность измельченного шлака достигается на уровне удельной поверхности  $S_{\text{ц}} = 0,6 - 0,9 \text{ м}^2/\text{г}$ . При этом достигается марка бесклнкерного цемента 300, а с добавкой клинкера в количестве 20 - 25 % - марка 400.

4. Полученные результаты указывают на целесообразность практического применения в строительной индустрии разработанной струйной технологии измельчения гранулированного доменного шлака, что позволит уменьшить в 4 - 5 раз удельный расход дорогостоящего клинкера в производстве цемента. Шлаки струйного помола можно использовать также как бесклнкерное вяжущее вещество в производстве шлакоблоков и легкомарочных бетонов. Продукт фильтра, отличающийся высокой дисперсностью, может найти широкое применение в качестве микронаполнителя бетонов.

5. Для внедрения в производство измельченного граншлака можно рекомендовать газоструйную установку (энергоноситель - продукты сгорания природного газа) или пневмоструйную (на холодном сжатом воздухе) производительностью 2 т/ч, энергоемкость которой составит по расчетам  $8,4 \text{ м}^3/\text{кг}$  шлака с удельной поверхностью  $S_{\text{ц}} \geq 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$  (максимальный размер частиц - 10 - 12 мкм, средний -  $4 \div 5$  мкм) [3, 9].

**Список литературы:** 1. Кравченко В.П., Струтинский В.А. Гидравлическая активность доменных шлаков. - Сталь. - 2007. - № 1. - С. 94 - 95. 2. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Влияние плотности энергии разрушения на механоактивационную способность диспергированных продуктов // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых. - 1988. - № 1. - С. 44 - 49. 3. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук: Д. - 2004. - 35 с. 4. Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Гаевой В.В., Прядко Н.С., Шуляк И.А. // Механоакти-

вация при измельчении полезных ископаемых . – Вісник КТУ. – 2007. – №.16. – С.59 – 65. **5.** *Пілов П.И., Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В.* Технологические возможности струйных измельчителей // ГИАБ. – № 3. – 2007. – С. 359 – 367. **6.** *Горобец Л.Ж., Гаевой В.В.* Влияние способа измельчения вяжущих материалов на их физико-механические характеристики // Тези допов. наук.-техн. конф. "Перспективні напрямки розвитку науки і технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів". – Д. – 2003. – С. 9 – 10. **7.** *Артамонов А.В., Кушка В.И., Воробьев В.В.* Получение цементов в центробежно-ударной мельнице // Вісник національного університету "ХП". – Харьков. – 2007. - № 26. – С. 32 – 36. **8.** *Козлов В.В.* Сухие строительные смеси. – М.: Изд-во ассоциации строительных вузов. – 2000. – 158 с. **9.** *Кравченко В.П., Пілов П.І., Горобець Л.Ж., Климанчук В.В., Струтинський В.А., Трубніков В.І.* Спосіб підготовки гранульованого доменного шлаку.- Патент на корисну модель № 18575. – 15.11.2006 р. – 4 с.

*Поступила в редколлегию 11.09.08*

УДК 666/666.7

**В.В. КОЛЕДА**, канд. техн. наук, **Т.Ю. ШМАТЬКО**,  
**С.Г. ПОЛОЖАЙ**, канд. техн. наук, **П.В. РЯБИК**, канд. техн. наук,  
УГХТУ, Днепропетровск

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОСВЯЗКИ КАРБИДКРЕМНИЕВОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕРМООБРАБОТКИ**

В роботі визначено та проаналізовано вплив швидкості набору температури на змочувальну здатність натрій-кальцій-силікатних стекол, що використовуються при виготовленні склокераміки, до карбиду кремнію. Показано визначальний вплив кристалізації стекол на можливість перебігу процесів між фазної взаємодії.

In this article are results of investigations it is certain and analyses influence of speed of a set temperature on moistening ability sodium-calcium-silicate glasses which are used at manufacturing glass ceramics to SiC. Significant influence of crystallization of glasses on an opportunity of course of processes of inter-phase interaction is show.

Исследования по разработке высокопрочных керамических и стеклокерамических материалов на основе карбида кремния, которые, как правило, используют при изготовлении различных ответственных износостойких деталей и узлов, становятся все более актуальными. Исходное сырье, применяемое в технологии карбидкремневой керамики, производится в Украине,